

Método para el refuerzo a flexión de vigas de hormigón armado con barras de fibra de carbono en configuración NSM pretensadas

V. Alcaraz Carrillo de Albornoz, A. Luizaga Patiño, V. Alcaraz Álvarez de Perea
Universidad Politécnica de Madrid, España

RESUMEN

El refuerzo de elementos estructurales sometidos a flexión mediante la utilización de barras (FRP) pretensadas es una técnica novedosa. En el presente trabajo se describe una nueva técnica para efectuar dicho pretensado. Se describen además los resultados obtenidos en una campaña de ensayos con 9 vigas: 3 probetas sin refuerzo, 3 probetas con refuerzo pasivo y 3 probetas con refuerzo activo. Para conseguir una rotura a flexión las vigas fueron reforzadas a cortante con unos anillos de tejido de fibra de carbono. La rotura de las vigas testigo fue dúctil, y las vigas reforzadas rompieron a cortante de forma explosiva. El pretensado de los elementos de refuerzo permitió incrementar la capacidad resistente de las vigas un 170% respecto de la viga testigo, produciéndose además un aumento en la rigidez de los elementos reforzados y una disminución en la fisuración de la viga. Se detectaron deficiencias en la técnica de refuerzo empleada, derivadas principalmente del método de aplicación del adhesivo estructural, que se propone mejorar en próximos trabajos.

1. INTRODUCCIÓN

El refuerzo de elementos estructurales en flexión ha supuesto una evolución acorde con la aparición de nuevos materiales, desde recrecidos de hormigón, incorporación de perfiles metálicos en la viga, unión de chapas de acero con conectores metálicos, encolado de láminas de acero con resinas epoxídicas o el pegado de laminados de compuestos de polímeros reforzados con fibras de carbono.

Estos últimos materiales han sido utilizados desde hace 30 años en distintas aplicaciones manufactureras. Sus principales ventajas son su ligereza (lo que facilita su montaje), gran capacidad resistente a tracción (10 veces superior al acero, lo que permite por ejemplo disminuir la cuantía de material a emplear y que los refuerzos sean prácticamente imperceptibles), la resistencia a la corrosión, y su baja fluencia. Como principales inconvenientes están su elevado precio y su vulnerabilidad al fuego..

En todos los procesos de refuerzo a flexión, se utiliza la cara de tracción como elemento transmisor de tensiones entre refuerzo y viga, usándose entre ambos un adhesivo estructural. Este recubrimiento, en principio diseñado para proteger la armadura y el núcleo de hormigón, pasa a ser el más importante y definitorio en la resistencia del

conjunto, por lo que es imprescindible su buen estado para acometer un proceso de refuerzo.

En el presente trabajo, además de reforzar vigas con barras de fibra de carbono en configuración NSM pegadas con resina epoxídica se han realizado refuerzos activos. Esto se consigue sometiendo a las varillas de refuerzo a un pretensado.

El pretensado del refuerzo supone un inconveniente por la fragilidad del mismo y su dificultad de implementación fuera del laboratorio. Existe poca literatura sobre este tema, destacando los trabajos realizados por Lorenzis et al. (2002), Nordin et al. (2002) y Boschetto et al. (2006). Para poder realizar este proceso se ha diseñado un dispositivo, que se encuentra en proceso de tramitación de patente.

2. PLAN EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del plan experimental, se construyeron 9 vigas de hormigón armado a escala reducida (20x10x110 cm), con armaduras longitudinal $A_s=084 \text{ cm}^2$, cercos de 4 mm c/5 cm, y un recubrimiento de 1,2 cm. La cuantía mecánica de la armadura pasiva ρ se situó en 0,00525, superior a la mínima establecida en la norma EHE-08, lo que garantizaba una rotura dúctil de las vigas. Se determinó el momento de agotamiento por fluencia del acero $M_1=3,18 \text{ KN-m}$. Se calculó igualmente el momento de agotamiento por aplastamiento del bloque comprimido de hormigón (suponiendo una sección sobreamada) $M_2=3 \times 10^{-4} f_{ck} b d^2=8,44 \text{ KN-m}$ (tensión en N/mm^2 y dimensiones en cm) . La diferencia entre estos dos momentos constituye el momento máximo que se puede introducir de forma eficaz en la viga. .

2.1 Materiales

Los materiales utilizados para la construcción de las vigas fueron ensayados y caracterizados en el laboratorio de Materiales de Construcción de la EUITOP (UPM).

Como elementos de refuerzo se emplearon un adhesivo estructural, barras de fibra de carbono (FRP) para el refuerzo a flexión y tejidos de fibra de carbono de 5 cm de ancho y una tensión de rotura de 430 N/mm^2 (ensayo a tracción) para el refuerzo a cortante. Estos materiales fueron igualmente caracterizados en laboratorio.

El adhesivo estructural se presenta en forma de dos componentes, resina epoxi y endurecedor. Las características mecánicas obtenidas fueron una resistencia a flexión de 39 N/mm^2 y un módulo de elasticidad $E=1.500 \text{ N/mm}^2$.

2.2 Ensayos de flexión e instrumentación

Para el estudio del comportamiento y los modos de fallo de las vigas se realizaron ensayos de flexión. El tercio central de las probetas queda sometido a un momento flector puro, y los dos tercios laterales sufren un momento flector que varía de forma lineal y un esfuerzo cortante constante. Los puntos de aplicación de la carga son de especial interés para el estudio, porque en ellos actúan de forma simultánea los máximos esfuerzos cortante y flector.

2.3 Refuerzo de vigas

Las 9 vigas fabricadas se dividieron en tres lotes del mismo tamaño, para poder contrastar estadísticamente los resultados obtenidos. La distribución de lotes fue la siguiente: lote A (vigas sin refuerzo), lote B (vigas con refuerzo pasivo) y lote C (vigas con refuerzo activo). Una vez realizada la caracterización de todos los materiales se procedió al refuerzo de las vigas de los lotes B y C.

Para el diseño de los refuerzos se realizó un análisis teórico, tomando como punto de partida los momentos de agotamiento de la sección en vigas no reforzadas. Los resultados del análisis teórico fueron los siguientes:

- Momento de fisuración ($M_f = 1,1 \text{ KN-m}$ y $P = 6,6 \text{ KN}$)
- Momento de agotamiento dúctil de la viga sin refuerzo ($M_u = 3,18 \text{ KN-m}$ y $P_u = 19 \text{ KN}$)
- Momento máximo que la viga puede soportar antes del aplastamiento del hormigón en el bloque comprimido ($M_{\max} = 8,45 \text{ KN-m}$ y $P_{\max} = 50 \text{ KN}$)

Como elementos de refuerzo a flexión se dispuso de barras FRP de 8 mm de diámetro. La técnica desarrollada para introducir una carga activa en el refuerzo requiere que el número de barras sea par, por lo que finalmente se dispusieron dos barras de refuerzo en cada una de las vigas de los lotes B y C.

La carga de tracción necesaria para equilibrar la capacidad resistente del bloque comprimido de hormigón era de 118KN y las dos barras de FRP empleadas pueden soportar hasta 200 KN, aunque con una deformación superior al 10%. Al dimensionar el refuerzo pasivo y activo se adoptó el diagrama de deformaciones propuesto por la EHE-08 (Figura 1), introduciendo un nuevo punto pivote **R** que representa la deformación del refuerzo.

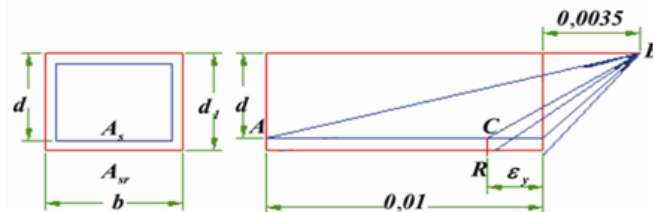


Figura 1: Dominios de deformación

2.3.1 Refuerzo pasivo

Este lote se reforzó a flexión con dos barras de FRP dispuestas longitudinalmente en la cara traccionada, como se ve en la figura 2

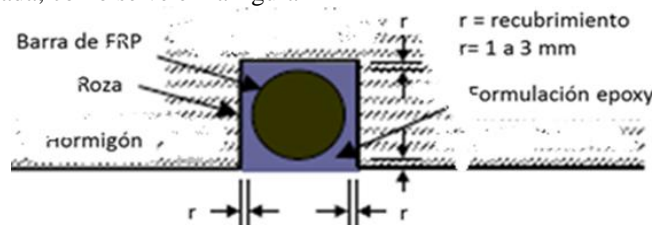


Figura 2: Corte transversal de la sección reforzada, mostrando el detalle de una barra de refuerzo.

En el diagrama de dominios de deformaciones se introduce el punto pivote R de refuerzo, que para una profundidad de 9,4 cm desde la cara comprimida, se corresponde con el 3,55‰ de deformación. Cuando el punto **R** se sitúa en el 4‰ (ligeramente superior a 3,55‰), el acero supera el 2,5‰. El comportamiento de la viga es de tipo elástico fisurado, lo que produce un desplazamiento hacia la cara superior del eje neutro. Se determinó la posición de la fibra neutra y el momento resistente en esta situación (Ecuación 1).

$$M_r = A_s f_y d - 0,4x + A_r f_{0,004} h - 0,4x \quad (1)$$

2.3.2 Refuerzo activo

El lote C se reforzó a flexión con dos barras de fibra de carbono, en las cuales se introdujo una precarga. El procedimiento propuesto consiste en un anclaje longitudinal simétrico aprovechando la tensión rasante que proporciona el adhesivo estructural (se realizaron ensayos previos para determinar la longitud de anclaje). Una vez colocadas las barras en la posición ideal, de manera similar al refuerzo pasivo, se procedió a su tesado mediante la acción de un gato hidráulico (Figura 3).

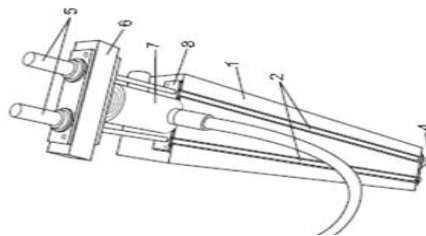


Figura 3: Esquema de una viga con el dispositivo de tesado.

Al introducir tensiones iniciales en el refuerzo el objetivo no es pretensar la sección, porque una viga en servicio y a reforzar, no está preparada para soportar importantes tensiones de tracción en la cara superior. Se trata de eliminar la flecha inicial de servicio y reducir la deformación del acero pasivo, transfiriendo el esfuerzo al refuerzo. Se plantea de forma teórica deformar el refuerzo en una proporción similar a la tensión de tracción admisible del hormigón $f_{ct}=2,73\text{N/mm}^2$, lo que requiere una fuerza de 13,6 KN, con una deformación de $9 \cdot 10^{-4}$. El momento resistente teórico se determina con la Ecuación 2.

$$M_{r1} = A_s f_y d - 0,4x + A_r f_{0,0049} h - 0,4x \quad (2)$$

2.3.3 Refuerzo a cortante

Según Luizaga (2005) el mecanismo de fallo de las vigas reforzadas sería a cortante. En efecto el fallo a flexión se estimaba que se produciría con unas cargas que generarían esfuerzos cortantes de 30 KN, muy superiores a los admisibles por la viga. Siendo el objetivo de la investigación estudiar el comportamiento del refuerzo en flexión, se reforzó también las vigas frente a esfuerzos cortantes.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los ensayos a flexión de todos los lotes se realizaron en las instalaciones del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. La carga se introdujo mediante un gato hidráulico accionado por una prensa. La carga del gato se repartía por medio de perfiles en dos puntos a los tercios de la luz, con una velocidad aproximada de 0,5 kN/s. Se realizaron breves escalones de carga mantenida para controlar la fisuración.

3.1 Resultados experimentales

En la siguiente tabla se adjuntan los resultados empíricos y teóricos de los diferentes lotes ensayados:

Lote	Viga	Fisuración		Elástico-fisurado		Agotamiento
		Carga	Flecha	Carga	Flecha	Carga
Lote A	V-1	5,7 KN	0,37 mm	21,8 KN	5,64 mm	28,0 KN
	V-2	5,7 KN	0,85 mm	20,9 KN	6,68 mm	25,7 KN
	V-3	4,6 KN	0,49 mm	21,1 KN	5,87 mm	25,3 KN
	Teórico	5,4 KN	0,34 mm	14,9 KN	7,09 mm	18,1 KN
Lote B	V-4	6,4 KN	0,52 mm	61,2 KN	11,08 mm	63,0 KN
	V-5	4,4 KN	0,38 mm	44,1 KN	7,76 mm	48,0 KN
	V-6	6,0 KN	0,48 mm	49,0 KN	9,21 mm	51,0 KN
	Teórico	5,5 KN	0,33 mm	33,0 KN	15,7 mm	
Lote C	V-7	8,7 KN	0,67 mm	73,3 KN	14,43 mm	75,6 KN
	V-8	8,5 KN	0,41 mm	47,8 KN	8,27 mm	51,5 KN
	V-9	NA	NA	64,1 KN	13,17 mm	64,4 KN
	Teórico	6,9 KN	0,41	34,3 KN	16,4 mm	

Tabla 1: Resultados experimentales y teóricos de las vigas ensayadas.

A continuación se adjunta un diagrama carga-flecha en centro de vano de las vigas V-3, V-4 y V-7. Se trata de las probetas que, como se describirá más adelante, resultan las más representativas de cada lote.

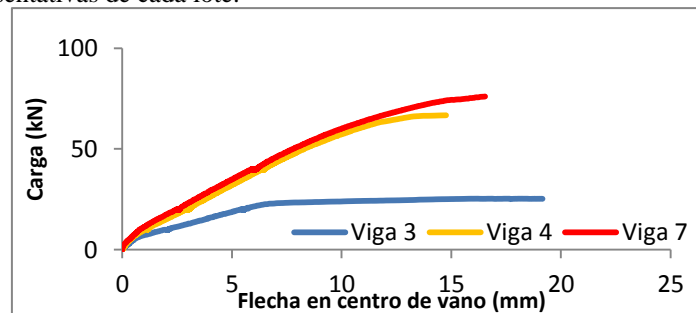


Figura 5: Diagrama carga-flecha en centro de vano para las vigas más representativas de cada lote.

3.2 Vigas sin refuerzo (Lote A)

Los resultados experimentales fueron los esperados, validándose de esta manera las fórmulas utilizadas.

El comportamiento inicial de estas vigas fue el de una sección homogénea, apareciendo las primeras fisuras con una carga cercana a los 6 KN. Cuando la carga subió a 10 KN, las fisuras en el tercio central se hicieron más evidentes y de configuración vertical, lo cual indicaba que el eje neutro se desplazaba hacia arriba y el comportamiento de la viga ya no era de carácter homogéneo sino elástico. En el diagrama carga-flecha en centro de vano se puede apreciar claramente este cambio de orientación que marca el paso de homogéneo a elástico. Se puede afirmar que el final de fase elástica es el que se corresponde con una carga en torno a 20 KN, acorde con el modelo teórico propuesto. La viga sigue admitiendo carga y en esta fase en que el bloque comprimido se ha reducido, aparecen las primeras fisuras de cortante¹. Finalmente todas las vigas se agotaron de forma dúctil para cargas situadas entre los 25 y los 27 KN.

3.3 Vigas con refuerzo pasivo (Lote B)

El comportamiento de estas vigas fue distinto al del observado en el lote anterior, destacando un incremento de la rigidez (lo que se tradujo en una menor flecha a igual carga). La carga teórica se calculó para una deformación del 4%, con la que se obtuvo durante los ensayos una flecha en centro de vano de 6,5 mm aproximadamente. Las tres vigas tuvieron un comportamiento similar hasta la carga de 40 KN, momento a partir del cual se hace patente la discrepancia introducida por la mayor longitud en los anclajes de los refuerzos a flexión de la Viga 4.

3.4 Vigas con refuerzo activo (Lote C)

Todas las vigas del Lote C tuvieron un comportamiento elástico hasta el momento de la rotura, que se produjo por cortante.

Los resultados obtenidos con los ensayos de la viga V-7 fueron satisfactorios: se produjo una reducción sustancial de la fisuración y de la flecha en el centro de vano en los primeros escalones de carga, en comparación con las vigas de los Lotes A y B.

4.- CONCLUSIONES

En virtud de los resultados teóricos y experimentales obtenidos, las principales conclusiones son las siguientes:

- La introducción del pretensado en el refuerzo mejora el comportamiento mecánico de la viga, aprovechando más eficazmente las características del material de refuerzo. En la rotura el refuerzo activo supone un incremento del 170% de carga respecto de la viga testigo.
- La introducción de precargas en los refuerzos a flexión resulta complicada, si bien ha podido conseguirse en condiciones próximas a las de una obra en los experimentos realizados. Será necesario mejorar no obstante la técnica de inyección del adhesivo estructural, para eliminar las oquedades que aparecieron durante los ensayos de las vigas V-8 y V-9.

BIBLIOGRAFÍA

¹ Las vigas del Lote A no fueron reforzadas a cortante.

- BOSCHETTO, G., PELLEGRINO, C., TINAZZI, D., & MODENA, C. (2006). Bond behaviour between FRP sheets and concrete: an experimental study. *The 2nd fib Congress*. Naples, Italy: fib.
- DE LORENZIS, L., MICELLI, F., & TEGOLA, A. (2002). Passive and active near-surface mounted FRP rods for flexural strengthening of RC beams. *Proc. ICCI-02, Third International Conference on Composites in Infrastructure*, San Francisco, June 10-12, 2002, Paper N.83.
- LUIZAGA, A. M. (2005). *Comportamiento Mecánico de Vigas de Hormigón Reforzadas con Bandas Encoladas con Resinas Epoxídicas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- NORDIN, H., TÄLJSTEN, B., & CAROLIN, A. (2002). CFRP near surface mounted reinforcement (NSMR) for prestressing concrete beams. *Proc. ICCI-02, Third International Conference on Composites in Infrastructure*, San Francisco, June 10-12, 2002